

文章编号: 2095-4980(2018)05-0791-05

## 基于复杂海情下的小目标探测雷达系统

沈 静<sup>1</sup>, 万国宾<sup>1</sup>, 潘雪峰<sup>2</sup>

(1.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129; 2.中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

**摘 要:** 复杂海情背景下的小目标探测是海面搜索、监视系列雷达的一项关键技术, 传统雷达很难保证在较低的虚警概率下, 可靠地检测海面小目标。基于复杂海情下海杂波散射功率特性分析, 结合高分辨力波形设计、天线快速扫描技术与海面小目标检测技术等雷达系统设计给出了在复杂海情背景下提高小目标检测性能的技术途径, 在较低虚警概率下, 保证有效、可靠地检测出复杂海情下的海面小目标。

**关键词:** 复杂海情; 小目标探测; 高分辨力波形; 系统设计

中图分类号: TN959.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0791

## Small target detection radar system based on complex sea conditions

SHEN Jing<sup>1</sup>, WAN Guobin<sup>1</sup>, PAN Xuefeng<sup>2</sup>

(1.The College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China;

2.AVIC LEIHUA Electronic Technology Research Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

**Abstract:** The small target detection in the complex sea context is a key technology for the sea search and surveillance series radar. The traditional radar system cannot guarantee reliable detection performance when encountering with these small targets. Based on the analysis of the scattered power characteristics of the sea clutter in complex sea conditions, a technical way is proposed to improve the performance of small targets in complex sea conditions by combining radar system design and sea surface small target detection technology, and ensure that under the low false alarm probability, small targets can be detected effectively and reliably on the sea.

**Keywords:** complex sea condition; small target detection; high resolution waveform; system design

海面小目标探测雷达在军事和民事领域都有非常重要的需求。在军事领域, 随着海洋权益争端日益突出, 各国竞相装备先进的海面搜索探测雷达, 以应对潜艇、隐身战舰、快艇等军事目标的威胁; 在民事领域, 可用于海上搜救、探测非法入境船只及冰山等小目标, 以保障国土安全和航行安全。由于 X 波段机载海面小目标探测雷达探测海域宽、受气象条件影响小、作用距离远等特点, 是空基海上搜索监视体系的重要组成部分, 受到世界主要军事强国极大的关注, 发展迅速。美国机载海面小目标探测雷达一直处于世界领先水平, 20 世纪 70 年代, 成功研制了 AN/APS-116 雷达, 采用行波管发射机和数字信号处理, 专为在高海情下探测暴露时间短促的潜望镜类目标设计。随后在 APS-116 雷达基础上改型完成 AN/APS-137(V)雷达研制, 增加了逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)技术, 提高了海面运动目标成像能力和对小目标、快速运动目标的识别能力。最新型小目标探测雷达 AN/APY-10 是专为美国海军新一代多任务海上巡逻机 P-8A(海神)研制, 具有很强的近海岸浅水环境下潜望镜等小目标探测、多精确度 SAR/ISAR 成像及海面/陆地目标分类识别等能力。

在强海杂波复杂海情背景下, 检测雷达散射截面(Radar-Cross Section, RCS)只有  $1\text{ m}^2$  且暴露海面时间只有 5 s 左右的潜艇潜望镜<sup>[1-3]</sup>小目标, 用常规的雷达系统设计理念及目标检测算法几乎不可能实现。本文分析了复杂海情下海杂波散射功率特性, 在此基础上研究小目标探测雷达系统主要技术参数设计。

### 1 复杂海情下海杂波散射功率特性分析

复杂海情下海杂波特性非常复杂, 与海域、风向、浪高、洋流等环境因素以及雷达分辨力、极化、擦地角、

频率等雷达工作参数之间存在复杂的非线性关系<sup>[4]</sup>。其中,风向与浪高对海杂波影响极大,不仅影响海杂波归一化散射强度,也影响其统计分布特性<sup>[5]</sup>。海杂波的强弱通常用单位面积雷达电磁波的截面积来表示,用 $\sigma^0$ 表征海杂波的平均强度, $\sigma^0$ 又称为归一化的雷达截面积,是描述海杂波雷达截面积的归一化参数,它反映单位面积海杂波对雷达电磁波信号的平均后向散射能力。为满足小目标探测雷达系统在复杂海情下的工作性能,针对不同海情下海杂波散射功率特性进行分析。

如图 1 所示,通过对海试验录取的海杂波数据进行分析,可以发现:有效浪高 0.74 m 海情下相比有效浪高 0.39 m 海情下的海杂波散射功率有明显增加,第 2 距离段(1 个距离段为 2 km)在正逆风区海杂波散射功率强度大约增加 4~5 dBm,其他距离段增加约 3 dBm。说明随着有效浪高的增加,海杂波散射功率有明显增强,同时随着距离增加,海杂波散射功率略有减小。通过试验数据分析,逆风区海杂波散射功率强度比侧风区约增加 5~10 dBm,而且统计分布上呈现出更强的非高斯特性。

## 2 小目标探测雷达系统设计

复杂海情下海杂波抑制与海面小目标检测是对海搜索监视系列雷达的关键技术<sup>[6]</sup>,对提高雷达作战效能具有非常重要的意义。海面小目标回波微弱,隐藏在强海杂波中,信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR)很低,给雷达稳定探测带来极大的挑战。为提高海面小目标检测性能,先进的小目标探测雷达采用高分辨波形设计、天线快速扫描、海面小目标检测等技术<sup>[7]</sup>。

### 2.1 高分辨力波形设计

在复杂海情的海杂波干扰背景下,海杂波的回波强度大于接收机噪声,雷达小目标的探测性能主要受海杂波制约。采用高分辨波形可以降低处理单元内的海杂波回波强度,是提高海面小目标信杂比的有效手段。信杂比公式为:

$$R_{sc} = \frac{\sigma_t 2B \cos \psi}{\sigma^0 R \theta_B c} \quad (1)$$

式中: $\sigma_t$ 为目标的 RCS; $\psi$ 为擦地角; $B$ 为雷达工作带宽; $\sigma^0$ 为海杂波归一化散射系数; $R$ 为目标距离, $\theta_B$ 为雷达方位波束宽度; $c$ 为光速。 $\sigma^0$ 与雷达频率、极化方式以及海情等多种因素有关,对于 X 波段水平极化雷达,低擦地角( $\psi < 8^\circ$ ),三级海情下, $\sigma^0$ 的典型值为-35~-33 dB<sup>[8]</sup>。

取目标 $\sigma_t = 1 \text{ m}^2$ , $\sigma^0 = -34 \text{ dB}$ ,图 2 给出了几组不同信号带宽、不同波束宽度下,信杂比与目标距离的关系。可以发现:通过提高信号带宽、降低波束宽度,可以有效提高信杂比。但信号带宽增大,对雷达硬件及后端的处理能力会提出更高的要求,而降低波束宽度会增大天线尺寸,影响天线快速环扫,故系统设计时需做权衡考虑。

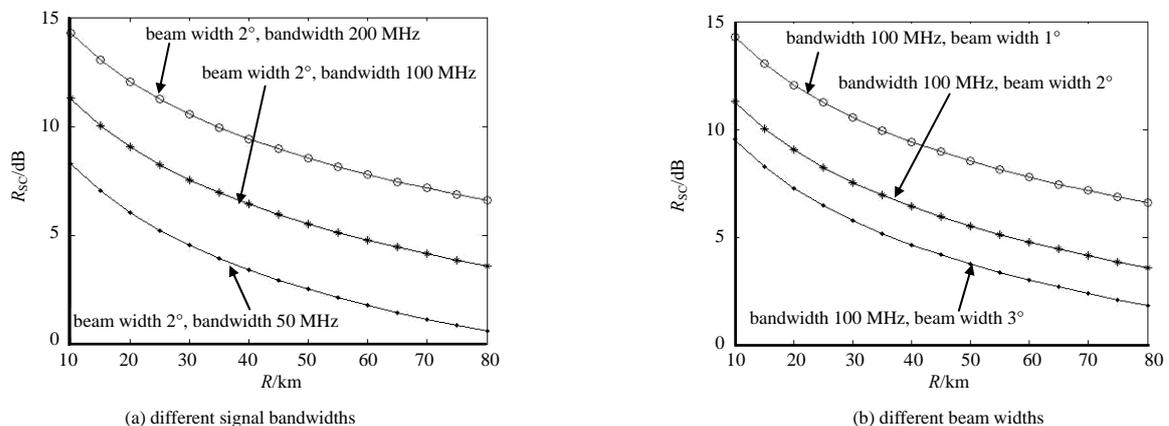


Fig.2 Relationship between the SCR and the distance of the detection target

图 2 信杂比与探测目标距离的关系

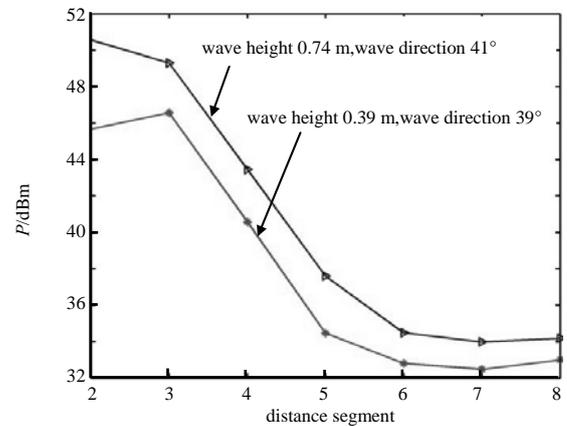


Fig.1 Scattering power of mean sea clutter at different wave heights

图 1 不同浪高下平均海杂波散射功率

### 2.2 天线快速扫描技术

海平面每时每刻都在变化，对于高分辨力的 X 波段雷达，当它以低入射角观测海面时，海杂波去相关处理所需要的时间约为 10 ms 量级<sup>[9]</sup>。在这个时间段内接收到的任意多个脉冲都是相关的，脉冲积累不会改善目标信杂比。然而，海平面在下一次扫描时经常会发生变化，因此海杂波在各次扫描间是去相关的。为利用海杂波扫描间的去相关性，可以在雷达设计时采用天线快速扫描技术，对海杂波进行去相关处理。如果采样脉冲的间隔时间大于海杂波的去相关时间，就可以在在一定程度上实现海杂波去相关，得到较好的回波积累增益。天线扫描速率越高，小目标的驻留时间越短，在驻留时间内，小目标的距离变化量越小，可以使用更窄的距离采样门，提高信杂比。另外，快速扫描还可以带来高数据率，高数据率有利于小目标航迹的快速建立，对潜艇潜望镜/通气管这类海面瞬态小目标的探测尤为重要。

雷达波束驻留时间内的目标回波脉冲数  $N$  为：

$$N = \frac{\theta_B}{\Omega} f_{pr} \tag{2}$$

式中： $\Omega$  为天线扫描速度； $f_{pr}$  为脉冲重复频率。为有效提高海面小目标信杂比，系统设计时要提高信号带宽，降低波束宽度。

美国装备的 AN/APS-137(V)型雷达在反潜工作模式下，扫描速度  $\Omega$  为 1 800°/s(300 rpm)，其方位波束宽度  $\theta_B$  为 1.05°，脉冲重复频率  $f_{pr}$  为 1 854 Hz，通过式(2)可以计算出波束驻留时间内的脉冲数  $N$  约为 1。由于波束驻留时间内只有 1 个脉冲，此时相邻脉冲时间间隔就是天线扫描一圈的时间，即 0.2 s，远远大于海杂波的相关时间，系统可以达到良好的海杂波去相关处理效果，而且能够在最短 5 s 的目标暴露时间内采集充足的数据样本。

### 2.3 海面小目标检测系统技术

复杂海情下小目标检测算法的优化设计对提高小目标探测雷达系统性能也至关重要<sup>[10]</sup>。由于海面小目标回波信号微弱，在进行恒虚警率(Constant False-Alarm Rate, CFAR)检测时，门限应该尽量低，才能保证小目标信号进入到下一级进行处理，但是低门限会带来较多虚警，因此需要通过存储多天线行扫描的过门限数据，综合利用目标与海杂波多维特征差异信息，才能保证在较低虚警概率下有效、可靠地检测出复杂海情下的小目标。

#### 2.3.1 检测前跟踪技术

检测前跟踪(Tracking Before Detection, TBD)是在低信杂比或信噪比情况下对小目标进行检测和跟踪的一种技术。单天线行扫描内不输出检测结果，而是将每行的信息数字化，并存储起来，然后在行与行之间对假设路径包含的点作几乎没有信息损失的相关处理，经过数行的积累处理，在目标的轨迹被估计出来后，检测结果与目标的航迹同时输出<sup>[11]</sup>。图 3 给出了 TBD 处理的原理示意图，海杂波和小目标都以天线行为基准在示意图中做了标注。TBD 处理被描述为一个速度模板，这个速度模板符合目标的运动轨迹，在 10 个天线行中，只要有 8 个标注点落入速度模板中，就认为目标存在。试验证明，采用 TBD 处理技术在保证对海面小目标一定检测概率的同时，利用目标与海杂波航迹在多扫描行间持续性与连贯性差异，能有效抑制海杂波虚警。

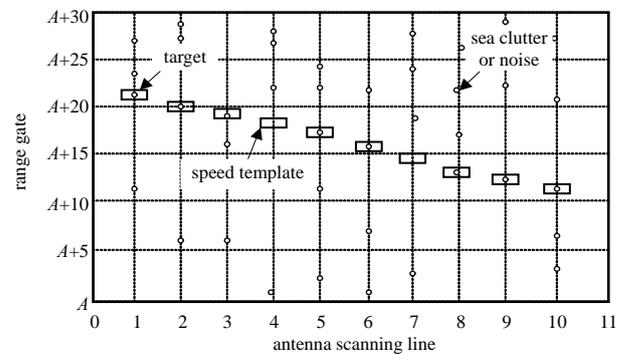


Fig.3 Schematic diagram of TBD processing  
图 3 TBD 处理示意图

TBD 处理的基本思想是对波束内多行原始数据或低门限检测后的数据做联合处理，搜索目标航迹片断，实现沿航迹方向的能量积累，然后利用积累域的航迹片断信息进行目标检测，接着再做常规的测距以及跟踪滤波处理。TBD 技术较适合解决小目标检测问题，但在海面小目标 TBD 方法工程化应用过程中，由于采用了高分辨力波形，距离单元数目多，直接对多行原始数据进行联合处理，计算量和存储量巨大，难以实现，因此需对多行原始数据进行预处理。传统的预处理方法是简单的低门限预处理，门限设置较低时，对减小数据量的作用不大；门限设得高，虽可减小数据量，但可能造成小目标信息丢失，因此如何进行有效的数据处理是复杂海情下小目标探测雷达设计的一个难点<sup>[12-13]</sup>。

#### 2.3.2 强海杂波与小目标回波频谱特征判别

采用 X 波段、水平极化、高分辨波形设计能够提高系统小目标探测信杂比，但同时会导致海杂波呈现出很

强的非高斯性, 出现许多离散的海尖峰信号, 这些海尖峰的 RCS 可达到  $10 \text{ m}^2$  左右<sup>[7-8]</sup>, 很容易被误认为海面小目标, 造成较多的虚警。在小目标探测雷达相参方式设计中, CFAR 检测在频域进行, 强海杂波回波频谱在距离向与海面小目标差别较小, 且强海杂波信号不易与小目标信号进行区分<sup>[14]</sup>, 复杂海情下脉压处理后的小目标与强海杂波回波图像及频谱如图 4 所示。

同时可以发现, 在频率向强杂波的回波频谱并不像小目标的频谱那样平坦, 也就是说海杂波的频谱相对小目标的频谱在频率向比较杂乱。综合利用海面小目标与强海杂波回波频谱特征差异信息, 小目标探测雷达系统采用频率向对最大值的滑窗浮动门限判断可以将小目标和海杂波区分开来, 抑制强海杂波造成的虚警。

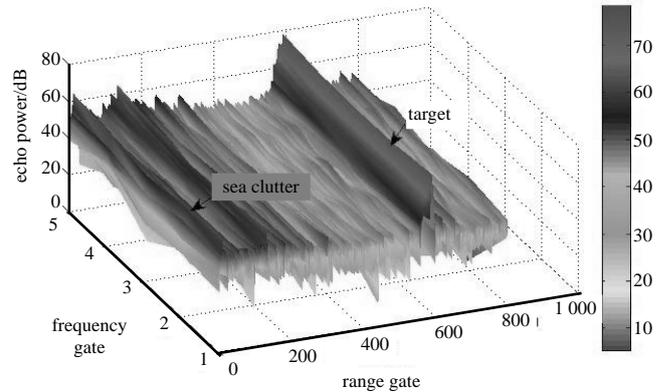


Fig.4 Echo spectrum of small target and the strong sea clutter after the pulse compression processing

图 4 高海情下脉压后的小目标与强海杂波回波频谱

### 3 结论

本文通过对复杂海情下海杂波散射功率特性进行分析, 研究分析了海面小目标探测雷达系统设计中高分辨波形、天线快速扫描等技术在提高小目标检测性能中的作用, 在此基础上, 结合 TBD、强海杂波与小目标回波频谱特征判别等小目标检测技术, 保证了在较低虚警概率下有效、可靠地检测出复杂海情下的海面小目标, 提高了小目标探测雷达系统相对传统的搜索雷达在复杂海情下的小目标检测性能。

#### 参考文献:

- [1] SMMITH J M, LOGAN R H. AN/APS-116 periscope-detecting radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, AES-16(1):66-73.
- [2] OUSBORNE J J, GRIFFITH D, YUAN R W. A periscope detection radar[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1997(18): 125-133.
- [3] TAIT P. Introduction to radar target recognition[M]. London, England: Institution of Electrical Engineers, 2005.
- [4] 吴三元, 邱新军, 马来群. 海面 RCS 与雷达海上目标检测[J]. 火控雷达技术, 2008, 37(2):51-53. (WU Sanyuan, QIU Xinjun, MA Laiqun. Sea surface RCS and radar maritime targets detection[J]. Fire Control Radar Technology, 2008, 37(2): 51-53.)
- [5] 李东宸. 海杂波中小目标的特征检测方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017. (LI Dongchen. Feature-based detection methods of small targets in sea clutter[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2017.)
- [6] 徐伟, 戴春华. 海杂波背景下慢速小目标探测技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(1):49-51. (XU Wei, DAI Chunhua. Research into the detection technologies for slow and small target under the background of sea clutter[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(1):49-51.)
- [7] ZHANG Zhigang, ZHANG Jianxue, ZHANG Yonggang. Research on the influence of ocean environment on sea clutter[J]. Procedia Environmental Science, 2011, 11(1):1108-1112.
- [8] 丁鹭飞, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. (DING Lufei, CHEN Jianchun. The theory of radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [9] SKOLNIK M I. 雷达系统导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. (SKOLNIK M I. Introduction to radar systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.)
- [10] 邓晓波, 皮亦鸣, 曹正林, 等. 基于 TBD 方法的弱小目标预警研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(2):57-61. (DENG Xiaobo, PI Yiming, CAO Zhenglin, et al. Early detection of small targets based on track-before-detection method[J]. Modern Radar, 2009, 31(2):57-61.)
- [11] 司军, 赵中兴, 吴俭, 等. 基于时间相关性的海面小目标检测技术[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(3):261-266. (SI Jun, ZHAO Zhongxin, WU Jian, et al. Detection technique of dim target in sea clutter based on time-coherent characteristic[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(3):261-266.)

- [12] 倪世道,马娟. 检测前跟踪技术在机载雷达数据处理中的实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):450-453. (NI Shidao,MA Juan. Technology implementation of track-before-detect based on airborne phased array radar data processing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):450-453.)
- [13] HANSEN J P,CAVLAERI V F. High resolution radar sea scatter,experimental observations and discriminants[R]. Naval Research Laboratory, 1982.
- [14] 赵志信,国磊,李永新. 强海杂波背景条件下海上目标检测方法[J]. 应用科技, 2006,33(8):30-33. (ZHAO Zhixin,GUO Lei,LI Yongxin. The method to detect signal on the sea with strong sea clutter[J]. Applied Science and Technology, 2006, 33(8):30-33.)

## 作者简介:



沈 静(1983-), 女, 江苏省无锡市人, 博士, 主要研究方向为雷达总体技术电磁辐射及散射特性分析等.email:49085924@qq.com.

万国宾(1967-), 男, 河南省林州市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线罩分析与设计、天线理论及电磁散射数值分析等.

潘雪峰(1982-), 男, 河南省虞城县人, 硕士, 主要研究方向为对海监视、搜索系列雷达总体技术.

-----  
(上接第 790 页)

- [10] PILTÉ M,BARBARESCO F. Tracking quality monitoring based on information geometry and geodesic shooting[C]// 2016 Radar Symposium. Krakow,Poland:IEEE, 2016:1-6.
- [11] STRAPASSON J E,PORTO J P S,COSTA S I R. On bounds for the Fisher-Rao distance between multivariate normal distributions[C]// AIP Conference Proceedings. ClosLuc,Amboise,France:[s.n.], 2015:313-320.

## 作者简介:



孙 伟(1977-), 男, 南京市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为多传感器融合, 首次在国内提出基于多假设跟踪的点航迹一体化数据融合架构, 达到国际先进国内领先水平.email:sunwei0011@sina.com.

赵心悦(1985-), 女, 哈尔滨市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为目标跟踪算法设计.

张玉玺(1985-), 男, 河南省驻马店市人, 博士, 实验师, 主要研究方向为雷达信号处理、高速电路设计等.

孙进平(1975-), 男, 甘肃省天水市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高分辨率雷达信号处理、数据处理、目标识别等.